# 不同抗性马尾松针叶中营养物质含量与对松突圆蚧抗性关系的判别分析

陈顺立[1]，杜瑞卿[2,*]，吴　晖[1]，张华峰[1]
（1. 福建农林大学林学院 福州 350002；2. 河南南阳师范学院生命科学与技术学院 河南南阳 473061）

**摘要**：为了探讨马尾松 *Pinus massoniana* 针叶营养物质含量与其对松突圆蚧 *Hemiberlesia pitysophila* Takagi 抗性的关系，选择了不同抗性的 10 个马尾松家系，分别测定未受松突圆蚧危害植株与受害植株针叶中可溶性糖、总糖、可溶性蛋白、全 N、游离氨基酸、粗脂肪等营养物质的含量和总糖/全 N 等 7 个指标，并采用判别分析法分析这 7 个指标与马尾松家系对松突圆蚧抗性的关系。结果表明：马尾松家系不论是否受松突圆蚧的危害，能明显区别抗性组别的指标都是可溶性蛋白($X_3$)、全 N($X_4$)和游离氨基酸总量($X_7$)，随抗性的降低，它们的含量呈上升趋势，受害植株中上述 3 个指标的含量低于未受害植株；受害后，各指标变化量中能明显区别抗性组别的是全 N($X_4$)，随着植株抗性的降低，针叶中的可溶性蛋白($X_3$)、全 N($X_4$)和游离氨基酸总量($X_7$)的含量变化量减小。据此得出：(1)可溶性蛋白($X_3$)、全 N($X_4$)和游离氨基酸总量($X_7$)是与抗性关系最密切的指标，含量与抗性呈负相关关系，变化量与抗性呈正相关关系；(2)受到危害后，无论含量或变化量，7 个指标都发生了重要变化，都表现出与抗性的相关性，构成了有效判别函数的组成变量；(3)因判别分析方法可以分析各指标的综合作用，应用该方法分析各营养成分与马尾松对松突圆蚧抗性的关系，比用方差分析和多重比较方法更有优越性。上述研究结果为抗松突圆蚧马尾松家系的选育及其抗性机理的深入研究，提供了重要的科学参考价值。

**关键词**：马尾松；松突圆蚧；抗虫性；营养物质；判别分析
**中图分类号**：Q969　**文献标识码**：A　**文章编号**：0454-6296(2011)03-0312-08

# Discriminant analysis of the relationship between nutrient contents in needles of *Pinus massoniana* and its resistance against *Hemiberlesia pitysophila* (Hemiptera: Diaspididae)

CHEN Shun-Li[1], DU Rui-Qing[2,*], WU Hui[1], ZHANG Hua-Feng[1] (1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. College of Life Science and Technology, Nanyang Normal University, Nanyang, Henan 473061, China)

**Abstract**: In order to investigate the relationship between the nutrient contents in needle of *Pinus massoniana* and its resistance against the pine armoured scale, *Hemiberlesia pitysophila*, contents of some nutrients were measured, including soluble sugar, total sugar, soluble protein, total N, free amino acids, crude fat and total sugar/total N in the needles of ten pine families both damaged and undamaged by *H. pitysophila*. Discriminant analysis was applied to analyze the relationship between seven indicators and the resistance of *P. massoniana* against *H. pitysophila*. Contents of soluble protein ($X_3$), total N ($X_4$) and total free amino acids ($X_7$) in the pines damaged or undamaged showed significant differences, suggesting they can be used for the indicators to distinguish the resistant group from the susceptible group. The three indicators increased with the decrease of tree resistance. The contents of the three nutrients in damaged pine were all significantly lower than those in undamaged pine. The total N ($X_4$) was significantly variable in discrimination of the resistance levels. The variation of soluble protein ($X_3$), total N ($X_4$) and total free amino acids ($X_7$) in the damaged pines all decreased while the resistance decreased. It is concluded that soluble protein ($X_3$), total N ($X_4$) and total free amino acids ($X_7$) might be the most important resistance indices. These indices and their variation have significantly negative and positive correlation with the tree's resistance against *H. pitysophila*, respectively. The all seven indicators and their variation changed while

基金项目：福建省科技厅重大科技专项(2006NZ0001-2)；福建省林业厅林木种苗攻关项目(2003-07)；南阳师范学院生物化学与分子生物学重点学科资助项目
作者简介：陈顺立，男，1949 年生，福建福州人，教授，研究方向为森林昆虫学与森林植物检疫，E-mail：cslfjau@126.com
* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: duruiqing8@163.com
收稿日期 Received: 2010-09-09；接受日期 Accepted: 2010-12-19

the pine needles were injured, showing a correlation between the resistance and construction of the variable of effective discriminant functions. Compared with multiple comparisons and analysis of variance, the discriminant analysis seems more comprehensive and scientific for multi-target, multi-object and multi-group analysis.

**Key words**: *Pinus massoniana*; *Hemiberlesia pitysophila*; insect resistance; nutrient; discriminant analysis

植物对植食性昆虫的抗性分为组成型抗性和诱导型抗性。组成型抗性是植物的一种固有特性，取决于不同基因型，总是存在于植物中并始终起作用；诱导型抗性是在表型水平上考察植物抗性，指被取食的植物影响植食者行为或降低其嗜好性的反应(Agrawal, 1999)，即在昆虫取食植物时，植物能够调节其体内化学物质的数量或组成，降低植物的营养水平，以对昆虫的取食产生拮抗(Haukioja, 1990)。研究植物的诱导抗性，可在实践上补充和完善害虫综合治理理论(娄永根和程家安, 1997)，而且对减少或不使用化学农药防治害虫的研究具有重要意义(李镇宇等, 2000)。李镇宇等(2000)在油松 *Pinus tabulaeformis* 对赤松毛虫 *Dendrolimus spectabilis* 的诱导化学防御研究中发现，受害油松新生针叶氨基酸总量及多数游离氨基酸含量下降，水溶性总糖、粗脂肪、生物碱含量及总糖/氨基酸比例上升。戈峰等(2002)报道了油松、马尾松 *Pinus massoniana*、华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii* Mayr 3 种松树在受到松毛虫中等程度的危害后，能迅速产生诱导抗性，昆虫生存所必需的还原糖、氨基酸、脂肪酸、蛋白质、Vc 等营养物质减少。马尾松受害后产生的滞后诱导抗虫性也与昆虫所需主要营养物质的减少有关。

松突圆蚧 *Hemiberlesia pitysophila* 是一种国际国内检疫害虫，主要危害松树的针叶、嫩梢和球果，使针叶和嫩梢生长受到抑制。松树受害严重时针叶脱落，新抽枝条变短变黄，甚至导致全株枯死(陈顺立等, 2004)。马尾松是受松突圆蚧危害最重的松属树种(陈泽藩, 1988)。前期研究表明，不同马尾松家系对松突圆蚧的抗性有显著差异(洪贞等, 2006)。研究马尾松对松突圆蚧的组成抗性和诱导抗性，有助于筛选抗性强且性状优良的种质以营造抗虫林分，提高松突圆蚧综合控制的效果。

陈顺立等(2010)已对不同马尾松家系营养物质含量与松突圆蚧抗性关系进行了研究，探讨了不同抗性马尾松家系的抗性特点。为了进一步分析松针叶各营养物质含量及其变化的综合作用与马尾松对松突圆蚧抗性的关系，本文应用判别分析法进一步分析二者的关系，明确各营养物质与抗性的关联性，基本思路及特点是：(1)在抗性的分组上，不是通过聚类分析划分，聚类分析易淡化指标的生物学意义，所分出类的生物学意义不明确。而是将反映马尾松感染松突圆蚧单个指标转化为更直接反映马尾松对松突圆蚧易感染和适生性的综合指标，依据转化后的综合指标进行分类。(2)在建立判别函数的过程中，既有对单个指标的方差分析，体现单个指标在组别上的影响作用，又通过逐步筛选法，建立最佳的判别函数，体现指标在抗性组别上的综合作用。(3)通过判别函数对不同情况下的抗性分组进行判别验证，从而把未受害、受害以及受害后指标值变化三者之间进行关联性分析，进一步揭示各指标与抗性的关系。总之，通过采用新的分类方法和判别分析法的进一步分析研究，旨在能提供更合理、精细和准确的结果。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验地概况及供试品种

试验地设置于福建省福清市瑶峰林场，海拔 100 ~ 220 m，年均气温 19.17℃，年均降水量 1 327.14 mm，全年平均相对湿度 77%。试验林中完全随机区组配置马尾松家系 30 个，无性系 7 个（设 2 个区组），树龄均为 5 年生，造林密度为 2 505 株/$hm^2$。地被物主要有铁芒萁 *Dicranopteris linearis*、桃金娘 *Rhodomyrtustom entosa*、菝葜 *Smilax* sp. 等。试验地设有接虫试验林和未接虫试验林，不同处理的试验林以木荷 *Schima superba* 间隔。

不同处理试验林接虫方法：在 2004 年 5 月松突圆蚧盛发期，挑选带有雌成虫的松针束(带虫量每束 7 ~ 11 头)倒插入试验林植株 2 年生侧梢中上部的针叶束中，每株东、西、南、北 4 个方向的枝条各接 5 束，计 20 束。接虫试验 2 年后，各供试家系的受害程度和生长状况差异明显，植株出现被害状，部分家系抽梢不正常。家系 469 达中度发生程度(有虫针束率为 31.25%)，其余家系有虫针束率小于 30%（洪贞等, 2006；陈顺立等, 2008），见表

1。选择对松突圆蚧有不同抗性的10个家系进行营养物质的测定。依据实际感染松突圆蚧的数量，所选家系及其对松突圆蚧的抗性分组指标计算方法如下：

假定有100株马尾松，每株有100束，则100株马尾松感染(发生)松突圆蚧的数量 $A = Y_1 \times Y_2 \times Y_3$，其中 $A$ 代表发生虫口数(头/百束·百株)，$Y_1$ 代表虫口密度(头/针束)，$Y_2$ 代表有虫针束率(%)，$Y_3$ 代表有虫株率(%)。它反映了马尾松对松突圆蚧的易感染性，数值越大，易感染性越强，抗性越低。松突圆蚧2龄若虫生长时间相对较长，它在相同数量的马尾松上的存活量反映了马尾松对松突圆蚧适生性，$B = A \times Y_4$，$B$ 代表2龄若虫存活量(头/百束·百株)，$Y_4$ 代表2龄若虫存活率(%)。

### 1.2 样品的采集和处理

于接虫2年后(2006年)在接虫试验林采集样株，高抗家系平均每束针叶雌成虫数≤1头；中抗家系平均每束针叶雌成虫数为2~3头；低抗家系平均每束针叶雌成虫数≥4头。接虫试验林和未接虫试验林采样方法相同，均在松突圆蚧盛发期(5月)，每家系随机选择6~8株样树，分别于样树上部的东、南、西、北各方向2年生枝条上采集20束未被害的松针，所采松针带回实验室后通过镜检确认无松突圆蚧为害。在相同的区组中，相同家系相同处理的样树上采得的松针混合为1个样品，共采集20份样品。2个区组即为2次重复。一部分样品保鲜带回实验室测定可溶性蛋白含量，其余样品带回实验室后用清水冲洗干净并晾干，然后以60℃干燥48 h，粉碎，过40目筛，装袋后置于干燥器中待测。

### 1.3 营养物质测定方法

可溶性糖和总糖含量采用蒽酮比色法测定(吴坤君和李明辉，1992；毛燕和王学利，1998)；可溶性蛋白质含量测定采用考马斯亮蓝G-250染色法(路阳等，1992)；全N含量测定采用凯氏定氮法(中国科学院上海植物生理研究所，1999)。游离氨基酸含量测定采用离子交换色谱分析法(贾健斌和赵熙和，2003)；粗脂肪含量测定采用残余法(杨伟，1989)。

### 1.4 数据统计与分析

采用SPSS 15.1和MATLAB7.1软件，进行判别分析(高惠璇，2005)和方差分析。

## 2 结果

### 2.1 马尾松家系的抗性分组

依据发生虫口数(头/百束·百株)($A$)和2龄若虫存活量(头/百束·百株)($B$)的大小，可以明显地把10个马尾松家系分成高抗、中抗和低抗3组(表1)。

**表1 马尾松家系受松突圆蚧危害的原始指标数据**

**Table 1 The original data of *Pinus massoniana* damaged by *Hemiberlesia pitysophila***

| 序号 Serial no. | 抗性水平 Resistance level | 家系 Family | 虫口密度(头/针束) Population density $Y_1$ | 有虫针束率(%) Percentage of injured needles $Y_2$ | 有虫株率(%) Percentage of injured trees $Y_3$ | 2龄若虫存活率(%) Survival rate of the 2nd instar nymphae $Y_4$ | 发生虫口数(头/百束·百株) Occurrence population on 100 bundles per 100 plants $A$ | 2龄若虫存活量(头/百束·百株) Survival amount of 2nd instar nymphae on 100 bundles per 100 plants $B$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 高 High | 330 | 0.0104 | 1.0400 | 15.0000 | 50.0000 | 0.2 | 0.1 |
| 2 | 高 High | 318 | 0.0104 | 1.0400 | 15.0000 | 50.0000 | 0.2 | 0.1 |
| 3 | 高 High | 465 | 0.0104 | 1.0400 | 15.0000 | 92.3100 | 0.2 | 0.18 |
| 4 | 高 High | 155 | 0.0833 | 1.0400 | 15.0000 | 50.0000 | 1.3 | 0.65 |
| 5 | 高 High | 386 | 0.0278 | 2.0800 | 25.0000 | 50.0000 | 1.4 | 0.7 |
| 6 | 中 Middle | 458 | 0.0833 | 15.6300 | 75.0000 | 33.3300 | 97.6 | 32.5 |
| 7 | 中 Middle | 588 | 0.2187 | 5.2100 | 75.0000 | 84.6200 | 85.5 | 72.3 |
| 8 | 中 Middle | 439 | 0.5000 | 5.5600 | 50.0000 | 57.7800 | 139.0 | 80.3 |
| 9 | 低 Low | 586 | 0.6805 | 16.6700 | 100.0000 | 100.0000 | 1 134.4 | 1 134.4 |
| 10 | 低 Low | 469 | 0.1667 | 31.2500 | 100.0000 | 20.0000 | 520.9 | 104.2 |

高抗 High resistance: $A < 10$, $B < 1$; 中抗 Middle resistance: $10 < A < 500$, $1 < B < 100$; 低抗 Low resistance: $500 < A$, $100 < B$.

## 2.2　马尾松未受松突圆蚧危害植株营养物质含量的判别分析

对马尾松未受害植株营养物质含量的实验测定结果见表 2。

**表 2　马尾松未受松突圆蚧危害植株营养物质含量**

**Table 2　Contents of seven nutrients in needles of *Pinus massoniana* without damage of *Hemiberlesia pitysophil***

| 抗性水平 Resistance level | 家系 Family | 可溶性糖(%) Soluble sugar $X_1$ | 总糖(%) Total sugar $X_2$ | 可溶性蛋白(mg/g) Soluble protein $X_3$ | 全 N(%) Total nitrogen $X_4$ | 粗脂肪(%) Crude fat $X_5$ | 总糖/全 N Total sugar/total nitrogen $X_6$ | (针叶)游离氨基酸总量(%) Total free amino acids $X_7$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 高 High | 330 | 7.69 | 10.58 | 16.21 | 1.62 | 5.41 | 6.53 | 8.11 |
| | 318 | 14.88 | 22.26 | 17.11 | 1.6 | 7.14 | 13.63 | 7.06 |
| | 465 | 4.77 | 16.59 | 16.53 | 1.59 | 6.24 | 10.24 | 7.13 |
| | 155 | 12.39 | 13.09 | 16.23 | 1.67 | 6.86 | 7.85 | 7.67 |
| | 386 | 10.37 | 15.23 | 16.33 | 1.54 | 5.28 | 9.88 | 7.35 |
| 中 Middle | 458 | 2.66 | 18.28 | 18.13 | 1.7 | 5.86 | 10.77 | 7.25 |
| | 588 | 3.91 | 15.51 | 17.77 | 1.64 | 8.97 | 9.43 | 7.94 |
| | 439 | 9.89 | 20.09 | 18.02 | 1.65 | 6.9 | 18.43 | 7.46 |
| 低 Low | 586 | 10.6 | 14.99 | 18.92 | 1.65 | 6.2 | 9.1 | 8.54 |
| | 469 | 7.61 | 10.46 | 18.26 | 1.67 | 6.19 | 6.27 | 8.54 |

对表 2 进行判别分析，样本容量为 10，每个指标(变量)在不同组中的平均数的差异性，即 $F$ 值和相应概率见表 3。考虑到样本较少对各组平均数相等性检验的影响，对各指标又进行了非参数检验：Kruskal-Wallis 检验，检验概率见表 3 最后一列，下同。

**表 3　各组平均数相等性检验**

**Table 3　Tests of equality of group means**

| | Wilks' Lambda | $F$ | $df_1$ | $df_2$ | Sig. | Kruskal-Wallis Sig. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $X_1$ | 0.710 | 1.431 | 2 | 7 | 0.301 | 0.8491 |
| $X_2$ | 0.747 | 1.185 | 2 | 7 | 0.360 | 0.2852 |
| $X_3$ | 0.095 | 33.242 | 2 | 7 | 0.000 | 0.0958 |
| $X_4$ | 0.570 | 2.635 | 2 | 7 | 0.140 | 0.4845 |
| $X_5$ | 0.770 | 1.048 | 2 | 7 | 0.400 | 0.3269 |
| $X_6$ | 0.692 | 1.559 | 2 | 7 | 0.276 | 0.2852 |
| $X_7$ | 0.362 | 6.163 | 2 | 7 | 0.029 | 0.1254 |

从表 3 可以看出，非参数检验 Kruskal-Wallis 检验的概率均无显著性，但概率相对大小与 $F$ 检验相对大小也基本一致。从 $F$ 检验结果来看，可溶性蛋白($X_3$)和游离氨基酸总量($X_7$)在 3 组间的差异有显著性，其他指标则无显著性。但经过筛选法可知，最佳判别函数变量组合是可溶性蛋白($X_3$)、全 N($X_4$)和游离氨基酸总量($X_7$)。判别函数组如下：

$$\begin{cases} F_1 = 313.371X_3 + 939.527X_4 + 226.596X_7 - 4\,182.746 \\ F_2 = 336.371X_3 + 976.34X_4 + 240.587X_7 - 4\,744.164 \\ F_3 = 354.603X_3 + 961.884X_4 + 258.96X_7 - 5\,201.26 \end{cases} \quad (1)$$

对判别函数检验，具有显著性($P = 0.01 < 0.05$)，对 10 个马尾松家系的抗性判别分组正确率为 100%。

$F_1$，$F_2$ 和 $F_3$ 分别代表第 1 组、第 2 组和第 3 组，按观察值分组的时候，将每一个观察值代入 3 个判别函数，以函数的大小作比较，函数值最大值，表明该对象属于该组。

如果依据 $F$ 大小，7 个指标的重要性依次为：可溶性蛋白($X_3$)、游离氨基酸总量($X_7$)、全 N($X_4$)、总糖/全 N($X_6$)、可溶性糖($X_1$)、总糖($X_2$)和粗脂肪($X_5$)。

## 2.3　马尾松受松突圆蚧危害植株营养物质含量的判别分析

对马尾松受害植株营养物质含量的测定结果见表 4。

对表 4 进行判别分析，每个指标(变量)在不同组中的平均数的差异性，即 $F$ 值和相应概率见表 5。

从表 5 可以看出，非参数检验 Kruskal-Wallis 检验的概率均无显著性，但概率相对大小与 $F$ 检验

**表 4 马尾松受松突圆蚧危害植株营养物质含量**

**Table 4 Contents of seven nutrients in needles of *Pinus massoniana* with the damage of *Hemiberlesia pitysophila***

| 抗性水平 Resistance level | 家系 Family | 可溶性糖(%) Soluble sugar $X_1$ | 总糖(%) Total sugar $X_2$ | 可溶性蛋白(mg/g) Soluble protein $X_3$ | 全 N(%) Total nitrogen $X_4$ | 粗脂肪(%) Crude fat $X_5$ | 总糖/全 N Total sugar/total nitrogen $X_6$ | (针叶)游离氨基酸总量(%) Total free amino acids $X_7$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 高 High | 330 | 5.96 | 7.68 | 12.62 | 1.12 | 6.83 | 6.83 | 5.93 |
| | 318 | 11.52 | 15.24 | 13.31 | 1.27 | 6.16 | 12.01 | 5.56 |
| | 465 | 4.18 | 10.97 | 14.17 | 1.23 | 6.58 | 8.88 | 5.72 |
| | 155 | 8.69 | 9.21 | 15.14 | 1.31 | 5.33 | 7.01 | 6.16 |
| | 386 | 7.68 | 10.46 | 13.24 | 1.25 | 6.72 | 8.36 | 6.34 |
| 中 Middle | 458 | 2.28 | 12.83 | 16.65 | 1.58 | 6.49 | 8.13 | 6.87 |
| | 588 | 3.07 | 11.82 | 15.98 | 1.23 | 7.47 | 9.6 | 6.12 |
| | 439 | 7.19 | 14.98 | 17.93 | 1.45 | 6.46 | 10.30 | 6.94 |
| 低 Low | 586 | 8.24 | 8.85 | 16.84 | 1.49 | 6.02 | 5.96 | 6.75 |
| | 469 | 4.38 | 7.64 | 17.24 | 1.59 | 5.52 | 4.81 | 7.71 |

**表 5 各组平均数相等性检验**

**Table 5 Tests of equality of group means**

| | Wilks' Lambda | $F$ | $df_1$ | $df_2$ | Sig. | Kruskal-Wallis Sig. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $X_1$ | 0.704 | 1.473 | 2 | 7 | 0.292 | 0.8491 |
| $X_2$ | 0.557 | 2.783 | 2 | 7 | 0.129 | 0.2852 |
| $X_3$ | 0.183 | 15.602 | 2 | 7 | 0.003 | 0.0614 |
| $X_4$ | 0.367 | 6.045 | 2 | 7 | 0.030 | 0.2451 |
| $X_5$ | 0.637 | 1.998 | 2 | 7 | 0.206 | 0.4745 |
| $X_6$ | 0.499 | 3.518 | 2 | 7 | 0.088 | 0.2852 |
| $X_7$ | 0.329 | 7.144 | 2 | 7 | 0.020 | 0.1482 |

相对大小也基本一致。从 $F$ 检验结果来看，可溶性蛋白($X_3$)、全 N($X_4$)和游离氨基酸总量($X_7$)在 3 组间的差异有显著性，其他指标则无显著性。但经过筛选法知道，最佳判别函数变量组合是 7 个指标的全部组合，而不仅是可溶性蛋白($X_3$)、全 N($X_4$)和游离氨基酸总量($X_7$)3 个指标的组合，可见单纯依据方差分析的显著性对于判别分组时存在误差，即使某些指标在组别间没有显著性，但它们的共同作用，对于区别组间差异仍是重要的。判别函数组如下：

$$\begin{cases} F_1 = 130.306X_1 - 1\,116.355X_2 + 348.844X_3 + 11\,147.48X_4 + 1\,005.304X_5 + 126.360X_6 - 221.352X_7 - 11\,786.28 \\ F_2 = 134.789X_1 - 1\,152.383X_2 + 372.71X_3 + 11\,570.524X_4 + 1\,064.563X_5 + 1\,309.795X_6 - 230.282X_7 - 13\,004.18 \\ F_3 = 142.547X_1 - 1\,217.309X_2 + 383.602X_3 + 12\,177.177X_4 + 1\,100.379X_5 + 1\,381.997X_6 - 244.531X_7 - 14\,088.82 \end{cases} \quad (2)$$

对判别函数检验，具有显著性($P = 0.033 < 0.05$)，对 10 个马尾松家系的抗性判别分组正确率为 100%。

利用(1)式判别函数对表 4 进行判别，结果高抗组的正确判别率为 1/5，中抗组和低抗组的正确判别率均为 100%，这说明可溶性蛋白($X_3$)、全 N($X_4$)和游离氨基酸总量($X_7$)在受害植株营中含量与未受害植株中的含量相比较，已经发生了变化，无法用原来的判别函数对它进行有效判别分析了。利用(2)式判别函数对表 2 进行判别，结果高抗组的正确判别率为 0，中抗组和低抗组的正确判别率分别为 1/3 和 1/2，再次说明 7 个指标值在受害植株营中含量与未受害植株中的含量已发生了变化。

如果依据 $F$ 大小，7 个指标的重要性依次为：可溶性蛋白($X_3$)、游离氨基酸总量($X_7$)、全 N($X_4$)、总糖/全 N($X_6$)、总糖($X_2$)、粗脂肪($X_5$)和可溶性糖($X_1$)。

### 2.4 马尾松受松突圆蚧危害植株营养物质含量变化的判别分析

受害植株营养物质含量变化是植株受害前后营养物质含量差值，即由表 2 减去表 4 所得，结果见表 6。

对表 6 进行判别分析，每个指标(变量)变化值在不同组中的平均数的差异性，即 $F$ 值和相应概率见表 7。

表 6　马尾松受松突圆蚧危害植株营养物质含量变化

Table 6　Changes of nutrient contents in needles of *Pinus massoniana* damaged by *Hemiberlesia pitysophila*

| 抗性水平 Resistance level | 家系 Family | 可溶性糖(%) Soluble sugar $X_1$ | 总糖(%) Total sugar $X_2$ | 可溶性蛋白(mg/g) Soluble protein $X_3$ | 全 N(%) Total nitrogen $X_4$ | 粗脂肪(%) Crude fat $X_5$ | 总糖/全 N Total sugar/total nitrogen $X_6$ | (针叶)游离氨基酸总量(%) Total free amino acids $X_7$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 高 High | 330 | 1.73 | 2.9 | 3.59 | 0.50 | -1.42 | -0.30 | 2.18 |
| | 318 | 3.36 | 7.02 | 3.80 | 0.33 | 0.98 | 1.62 | 1.50 |
| | 465 | 0.59 | 5.62 | 2.36 | 0.36 | -0.34 | 1.36 | 1.41 |
| | 155 | 3.70 | 3.88 | 1.09 | 0.36 | 1.53 | 0.84 | 1.51 |
| | 386 | 2.69 | 4.77 | 3.09 | 0.29 | -1.44 | 1.52 | 1.01 |
| 中 Middle | 458 | 0.38 | 5.45 | 1.48 | 0.12 | -0.63 | 2.64 | 0.38 |
| | 588 | 0.84 | 3.69 | 1.79 | 0.41 | 1.50 | -0.17 | 1.82 |
| | 439 | 2.70 | 5.11 | 0.09 | 0.20 | 0.44 | 8.13 | 0.52 |
| 低 Low | 586 | 2.36 | 6.14 | 2.08 | 0.16 | 0.18 | 3.14 | 1.79 |
| | 469 | 3.23 | 2.82 | 1.02 | 0.08 | 0.67 | 1.46 | 0.83 |

表 7　各组平均数相等性检验

Table 7　Tests of equality of group means

| | Wilks' Lambda | F | $df_1$ | $df_2$ | Sig. | Kruskal-Wallis Sig. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $X_1$ | 0.964 | 0.129 | 2 | 7 | 0.881 | 0.6826 |
| $X_2$ | 0.999 | 0.003 | 2 | 7 | 0.997 | 0.4745 |
| $X_3$ | 0.588 | 2.456 | 2 | 7 | 0.156 | 0.1983 |
| $X_4$ | 0.417 | 4.897 | 2 | 7 | 0.047 | 0.2607 |
| $X_5$ | 0.902 | 0.380 | 2 | 7 | 0.697 | 0.3152 |
| $X_6$ | 0.903 | 0.376 | 2 | 7 | 0.700 | 0.7275 |
| $X_7$ | 0.819 | 0.775 | 2 | 7 | 0.496 | 0.6347 |

从表 7 可以看出，非参数检验 Kruskal-Wallis 检验的概率都无显著性，但概率相对大小与 $F$ 检验相对大小也基本一致。从 $F$ 检验结果来看，只有全 N($X_4$)具有显著性，其他指标都没有显著性。但经过筛选法知道，最佳判别函数变量组合是 7 个指标的全部组合，而不仅是全 N($X_4$)，可见单纯依据方差分析的显著性对于判别分组时存在误差，即使某些指标在组别间没有显著性，但它们的共同作用对于区别组间差异仍是重要的。判别函数组如下：

$$\begin{cases} F_1 = 7.333X_1 + 1.41X_2 - 23.786X_3 + 215.016X_4 - 31.502X_5 - 4.564X_6 + 12.739X_7 - 29.357 \\ F_2 = -0.012X_1 + 0.283X_2 - 6.419X_3 + 110.865X_4 - 8.18X_5 + 0.009X_6 - 1.16X_7 - 9.36 \\ F_3 = 5.305X_1 + 1.522X_2 - 4.848X_3 - 133.861X_4 - 6.147X_5 - 1.304X_6 + 33.91X_7 - 19.538 \end{cases} \tag{3}$$

对判别函数检验，具有显著性($P = 0.043 < 0.05$)，对 10 个马尾松家系的抗性判别分组正确率为 100%。

如果依据 $F$ 大小，7 个指标的重要性依次为：全 N($X_4$)、可溶性蛋白($X_3$)、游离氨基酸总量($X_7$)、粗脂肪($X_5$)、总糖/全 N($X_6$)、可溶性糖($X_1$)和总糖($X_2$)。

## 3　结论与讨论

在马尾松未受害时，对区别抗性组别有显著性的是可溶性蛋白($X_3$)、全 N($X_4$)和游离氨基酸总量($X_7$)，而且随抗性的降低，它们的含量总体呈上升趋势，并且依据 3 个指标的共同作用，完全可以正确分组。

在马尾松受害植株中，对区别抗性组别有显著性的仍是可溶性蛋白($X_3$)、全 N($X_4$)和游离氨基酸总量($X_7$)，而且随抗性的降低，它们的含量总体仍呈上升趋势，但含量较未受害时有所减少。

在马尾松受害植株中，各指标与未受害植株比较的变化量对区别抗性组别有显著性的是全 N($X_4$)，但重要的仍是可溶性蛋白($X_3$)、全 N($X_4$)和游离氨基酸总量($X_7$)，但含量变化的特点是随抗

性的降低，变化量呈减小的趋势，这与未受害、受害后3个指标含量随抗性的降低而呈上升趋势正好相反，这就很好地解释了马尾松对松突圆蚧的易感性和适生性：具有易感性的低抗家系植株针叶可溶性蛋白($X_3$)、全N($X_4$)和游离氨基酸总量($X_7$)含量高，有利于松突圆蚧的生长发育，因此同时具有适生性。高抗家系受害植株针叶的可溶性蛋白($X_3$)、全N($X_4$)和游离氨基酸总量($X_7$)含量显著低于未受害植株，说明高抗家系受松突圆蚧危害后，体内营养成分显著下降，阻碍了松突圆蚧的生长发育，降低了植株对该虫的适生性，导致松突圆蚧2龄若虫存活数量减少。高抗家系营养成分的降低幅度比低抗家系更大，说明高抗家系植株对松突圆蚧的危害产生了更为强烈的应激反应，这表明高抗家系对松突圆蚧的危害具有更高的诱导抗性；低抗家系受害植株营养成分变化不大，表明其未在改变营养含量方面对松突圆蚧的危害产生诱导抗性。

综上所述，可以得出基本结论：

(1)在营养成分方面，可溶性蛋白($X_3$)、全N($X_4$)和游离氨基酸总量($X_7$)是与抗性关系最密切的指标，含量与抗性呈负相关关系，变化量与抗性呈正相关关系。

(2)马尾松在受到松突圆蚧的危害后，无论含量或变化量，可溶性糖($X_1$)、总糖($X_2$)、可溶性蛋白($X_3$)、全N($X_4$)、粗脂肪($X_5$)、总糖/全N($X_6$)和游离氨基酸总量($X_7$)7个指标都发生了重要变化，都表现出与抗性的相关性，构成了有效判别函数的组成变量。

(3)判别分析对于多指标、多对象、多组别的分析，较方差分析和多重比较综合性强，能体现多指标的共同作用，分析结果更加全面。

陈顺立等(2008)采用聚类分析法对10个家系进行抗性分类，分类结果为：高抗：318，330，386，465；中抗：155，586，588；低抗：439，458，469，与本研究对10个马尾松家系的抗性分组，存在差异；对营养物质含量与抗性关系的研究，陈顺立等(2010)采用方差分析法，本研究采用的是判别分析法，因此在结果上也存在差异，但在全N($X_4$)和游离氨基酸总量($X_7$)的含量与马尾松对抗性的关系上，两个研究得出了一致的结果。

营养物质可能在下述情况下引起植物对植食性昆虫的抗生作用：(1)缺乏某些营养物质，如维生素或主要氨基酸；(2)某些营养物质，特别是氨基酸或特定的固醇含量不足；(3) 有效营养物质不平衡(Painter，1969；Leather *et al.*，1987)。松突圆蚧连年在马尾松各个家系上危害，表明马尾松各个家系的营养物质种类和含量均能够满足松突圆蚧生长发育的需求，所以马尾松对松突圆蚧的抗性高低是由于营养物质含量的多少而表现为它的适生性。马尾松受松突圆蚧危害后，可溶性糖、总糖、可溶性蛋白、全N、总游离氨基酸等营养物质含量降低，说明这些营养物质的不足或下降可引起马尾松对松突圆蚧的抗生作用，从而抑制了松突圆蚧的正常生长发育，这与本文的研究结果是一致的。

糖类物质、可溶性蛋白、氨基酸对昆虫的营养作用已较明确(Sullivan *et al.*，1997；彩万志等，2001)。N是植物体内许多重要有机化合物的组分，其中蛋白态N通常占80%~85%，核酸态N约占10%，此外，N还是叶绿素、一些维生素和许多酶的组分(陆景陵，1994)。有关哪些含N化合物在马尾松对松突圆蚧抗性中起作用及其作用的机制还有待进一步研究。总之，本文的研究结果和结论，将为抗松突圆蚧马尾松家系的选育及其抗性机理的深入研究，防治松突圆蚧对马尾松家系的危害，科学合理保护马尾松，提供了重要的科学参考价值。

## 参 考 文 献 (References)


Agrawal AA, 1999. Induced plant defense: evolution of induction and adaptive phenotypic plasticity. In Agrawal A, Tuzun S, Bent E eds. Inducible Plant Defenses Against Pathogens and Herbivores: Biochemistry, Ecology, and Agriculture. American Phytopathological Society Press, St. Paul, Minnesota. 251 – 268.

Cai WZ, Pang XH, Hua BZ, Liang GW, Song DL, 2001. General Entomology. China Agricultural University Press, Beijing. 118 – 120. [彩万志，庞雄飞，花保祯，梁广文，宋敦伦，2001. 普通昆虫学. 北京：中国农业大学出版社. 118 – 120]

Chen SL, Lin QY, Huang JC, 2004. Integrated Pest Management of Major Tree Species in South China. Xiamen University Press, Xiamen. 113 – 121. [陈顺立，林庆源，黄金聪，2004. 南方主要树种害虫综合管理. 厦门：厦门大学出版社. 113 – 121]

Chen SL, Wu H, Deng ZD, Wei CJ, Huang ZY, Hong Z, 2010. Relationship between nutrients content of different families of *Pinus massoniana* and its resistance against *Hemiberlesia pitysophila*. *Scientia Silvae Sinicae*, 46(2): 87 – 94. [陈顺立，吴晖，邓招娣，魏初奖，黄振裕，洪贞，2010. 马尾松不同家系营养物质含量与松突圆蚧抗性的关系. 林业科学，46(2): 87 – 94]

Chen SL, Wu H, Hong Z, Zhu QM, Shao BJ, 2008. Study on growth status of masson pine families damaged by *Hemiberlesia pitysophila*. *Journal of Fujian College of Forestry*, 28(2): 97 – 100. [陈顺立，吴晖，洪贞，诸泉民，邵柏君，2008. 马尾松家系受松突圆蚧危害后生长状况研究. 福建林学院学报，28(2): 97 – 100]

Chen ZF, Yang ZX, Xu JX, Zhai CL, Huang ME, Huang YJ, 1988.

Preliminary study on resistance against *Hemiberlesia pitysophila* of 15 kinds of pines. *Forest Pest and Disease*, (2): 1-2. [陈泽藩，杨肇兴，徐家雄，翟才梁，黄慕娥，黄永进，1988. 十五种松树对松突圆蚧抗性的初步研究. 森林病虫通讯，(2)：1-2]

Gao HX, 2005. Applied Multivariate Statistical Analysis. Beijing University Press, Beijing. 352-360. [高惠璇，2005. 应用多元统计分析. 北京：北京大学出版社. 352-360]

Ge F, Li ZY, Xie YP, Li YF, 2002. Some characteristics of induced resistance of China pines to pest population dynamics. *Journal of Beijing Forestry University*, 24(3): 61-65. [戈峰，李镇宇，谢映平，李艳芳，2002. 我国主要松树诱导抗虫性的一些规律比较. 北京林业大学学报，24(3)：61-65]

Haukioja E, 1990. Induction of defenses in trees. *Ann. Rev. Entomol.*, 36: 25-42.

Hong Z, Chen SL, Wu H, Wei CJ, Yang Y, Liang YC, 2006. A preliminary study on injury-respond in different strains of masson pine due to *Hemiberlesia pitysophila*. *Entomological Journal of East China*, 15(3): 201-205. [洪贞，陈顺立，吴晖，魏初奖，杨勇，梁一池，2006. 松突圆蚧对不同马尾松家系危害的初步研究. 华东昆虫学报，15(3)：201-205]

Institute of Plant Physiology and Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai Association of Plant Physiology, 1999. Experimental Guide of Modern Plant Physiology. Science Press, Beijing. 133-134. [中国科学院上海植物生理研究所，上海市植物生理学会，1999. 现代植物生理学实验指南. 北京：科学出版社. 133-134]

Jia JB, Zhao XH, 2003. Determination of amino acids in food. National Standard of the People's Republic of China, GB/T 5009, 124-2003. [贾健斌，赵熙和，2003. 食品中氨基酸的测定方法. 中华人民共和国国家标准，GB/T 5009, 124-2003]

Leather SR, Watt AD, Forrest GI, 1987. Insect-induced chemical changes in young lodgepole pine (*Pinus contorta*): the effect of previous defoliation on oviposition, growth and survival of the pine beauty moth, *Panolis flammea*. *Ecological Entomology*, 12: 275-281.

Li ZY, Wang Y, Chen HS, Xu ZC, Lu YB, 2000. Induced chemical defenses and delayed induced resistance of *Pinus tabulaeformis* Carr. to *Dendrolimus spectabilis* Butler. *Scientia Silvae Sinicae*, 36(1): 66-70. [李镇宇，王燕，陈华盛，许志春，路永波，2000. 油松对赤松毛虫的诱导化学防御及滞后诱导抗性. 林业科学，36(1)：66-70]

Lou YG, Cheng JA, 1997. Induced plant resistance to phytophagous insects. *Acta Entomologica Sinica*, 40(3): 320-331. [娄永根，程家安，1997. 植物的诱导抗虫性. 昆虫学报，40(3)：320-331]

Lu JL, 1994. Plant Nutrition. China Agricultural University Press, Beijing. 23-24. [陆景陵，1994. 植物营养学. 北京：中国农业大学出版社. 23-24]

Lu Y, Wang XS, Ding LL, Wang PZ, 1992. A rapid and sensitive determination of protein concentration by using coomassie brilliant blue G-250. *Journal of Biology*, 45(1): 24-26. [路阳，王贤舜，丁丽俐，王培之，1992. 用考马斯亮兰 G-250 迅速、灵敏地测定蛋白质浓度. 生物学杂志，45(1)：24-26]

Mao Y, Wang XL, 1998. Protein and total sugar contents determined for nine species of bamboo leaves. *Journal of Bamboo Research*, 17(2): 18-20. [毛燕，王学利，1998. 毛竹等九种竹叶中蛋白质和总糖含量的测定. 竹子研究汇刊，17(2)：18-20]

Painter RH, 1969. Plant and animal resistance to insect. In: McGovran ER ed. Principles of Plant and Animal Pest Control, Vol. 3 (Insect-Pest Management and Control). National Academy of Sciences Publisher, Washington DC. 64-69.

Sullivan BT, Berisford CW, Dalusky MJ, 1997. Field response of southern pine beetle parasitoids to some natural attractants. *Journal of Chemical Ecology*, 23(3): 837-856.

Wu KJ, Li MH, 1992. Nutritional ecology of the cotton bollworm, *Heliothis armigera* (Hübner): effects of dietary sugar concentration on development and reproduction. *Acta Entomologica Sinica*, 35(1): 47-52. [吴坤君，李明辉，1992. 棉铃虫营养生态学的研究：食物中糖含量的影响. 昆虫学报，35(1)：47-52]

Yang W, 1989. A study on determination of crude fat in Chinese toon seed with the residue weight method. *Journal of Shandong Agricultural University* (*Natural Science*), (4): 75-78. [杨伟，1989. 残余法测定香椿籽中粗脂肪含量的研究. 山东农业大学学报(自然科学版)，(4)：75-78]

（责任编辑：赵利辉）